

Artigo

Estudo da influência do tratamento térmico nas propriedades termomecânica de uma liga com efeito de memória de forma

Wictor Guilherme Paiva^[1], Zoroastro Torres Vilar^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido; wictor_guilherme@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido; zoroastro@ufersa.edu.br

Data da defesa: dia/mês/ano;

Resumo: A capacidade de utilização e a versatilidade de alguns materiais poderem emitir uma resposta eletromecânica a uma excitação são encontradas nos materiais inteligentes. Dentre esses materiais, as ligas, com efeito, memória de forma possuem a capacidade de atuar termomecanicamente, com variação de rigidez, gerando força e se modificando geometricamente através da variação de temperatura. Propriedades essas que são muito bem aceitas no meio tecnológico e tem sido cada vez mais solicitadas e ampliadas nas áreas de utilização desse tipo de material, especialmente dentro da indústria e odontologia. Diante disso foi objeto de estudo com as variações de temperatura e tempo para diferentes tratamentos térmicos com ligas de NiTi. Com o objetivo de realizar uma caracterização da liga NiTi, realizou-se um planejamento experimental que foi possível obter modelos que expressam com proximidade a variação das temperaturas de transformação de fase com os parâmetros de tratamento térmico, em seguida o tratamento térmico nas amostras variando temperatura e tempo de permanência. Após isso foi realizado um ensaio RET (Resistência Elétrica x Temperatura) e a caracterização da liga objetivando obter as temperaturas de ativação e transformação de fases, com o intuito de entender o melhor tratamento para a melhor performance da liga em uma aplicação específica.

Palavras-chave: Memória de forma; Tratamento térmico; Caracterização.

Resumo: The usability and versatility of some materials being able to emit an electromechanical response to an excitation is found in smart materials. Among these, alloys with shape memory effect have the ability to act thermomechanically, with stiffness variation, generating strength and modifying geometry, through temperature variation. These properties are very well accepted in the technological environment and the areas of use of this type of material have been increasingly requested and expanded, especially within industry and dentistry. In view of this, it will be the object of study with temperature and time variations for different heat treatments with NiTi alloys. In order to perform a characterization of the NiTi alloy, an experimental planning was carried out that made it possible to obtain models that closely express the variation of the phase transformation temperatures with the thermal treatment parameters, then the thermal treatment in the samples varying temperature and length of stay. After that, an RET test (Electrical Resistance x Temperature) and the characterization of the alloy were carried out in order to obtain the activation and phase transformation temperatures, in order to understand the best treatment for the best performance of the alloy in a specific application.

Keywords: shape memory alloy, heat treatment, processing temperatures.

1. INTRODUÇÃO

O aprimoramento de projetos de estruturas tem possibilitado a inserção de sistemas integrados, juntamente com a aplicação de materiais com propriedades bastante peculiares, capazes de perceber e se adaptar a possíveis alterações nas condições ambientais e operacionais [1].

Em 1938, Arne Olander foi o primeiro a observar o efeito memória de forma (EMF) em ligas metálicas, quando Greninger, da Universidade de Havard, e Mooradian, do Massachusetts Institute of Technology, descobriram que a martensita, transformação resultante de um movimento coordenado e/ou cooperativo entre os átomos, esse efeito, apresentado no bronze pode ser induzido por tensão mecânica e depois desaparecer com o aquecimento [2].

A utilização de ligas com memória de forma (LMF) na concepção de sistemas inteligentes está cada vez mais disseminada. Esta classe de liga metálica possui ampla gama de aplicações dentro destes sistemas, que incluem desde sua utilização como componente principal em sistemas mecânicos à apenas um gatilho que permita o funcionamento de um sistema mais complexo. Dentro desta classe, que conta com a presença de ligas como: CuZnAl, CuAlNi e FeMnSi, as ligas NiTi se destacam devido a sua boa propriedade de memória de forma, resistência a corrosão, propriedades mecânicas, e em especial, resistência a fadiga [3].

De acordo com [4], o EMF pode ser classificado em unidirecional (one way) ou bidirecional (two way) baseando-se no comportamento mecânico do material frente a um ciclo térmico, como pode ser observado nas Figuras 01 e 02 respectivamente. A memória de forma unidirecional, mais comum entre os materiais, caracteriza-se pela recuperação do material uma única vez quando submetido a alta temperatura, de tal forma que, quando resfriados novamente, estes não voltam ao estado deformado.

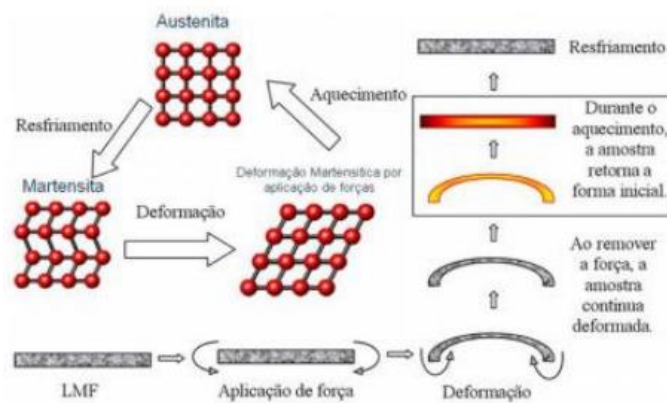


Figura 01: Efeito memória de forma “one way”. Reis (2006).

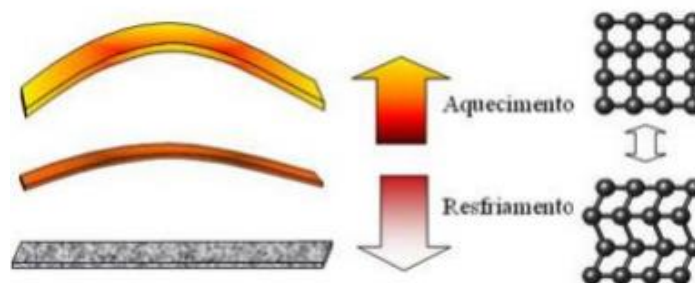


Figura 02: Efeito memória de forma “two way”. Reis (2006).

De maneira mais direta, a classificação *One Way* não volta ao estado inicial sem que haja ação de uma força externa para deformação. Já na classificação por *two way* é um efeito reversível, permitindo transformação de fase martensita para austenita no aquecimento e a transformação inversa no resfriamento, sem que haja a necessidade do material ser deformado para se iniciar um novo ciclo de transformações.

O aprimoramento de projetos de estruturas tem possibilitado a inserção de sistemas integrados, em termos de estruturas inteligentes, estruturas adaptativas e estruturas ativas, que fazem parte de um mesmo campo de estudo atualmente em forte desenvolvimento internacional. Campo este que, de acordo com [1] se refere à integração de atuadores e sensores aos componentes estruturais e ao uso de alguma espécie de unidade de controle ou amplificação e processamento de sinais, com o objetivo de conceber um sistema capaz de melhorar o desempenho estrutural.

E para desenvolver melhor o comportamento dessas estruturas e materiais inteligentes, como é o caso da LMF, é necessário realizar análises e experimentos para entender o comportamento dos materiais e designar o melhor atuador para determinadas aplicações. Análises essas que podem ser através da técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC), análise mecânica dinâmica (DMA) e o ensaio de resistência elétrica x temperatura (RET), que é o utilizado nos laboratórios da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA).

Este tipo de técnica de caracterização é utilizado desde os primórdios das análises de ligas de memória de forma e é caracterizada por determinar a temperatura de transformação em função da resistividade elétrica da liga. O aumento ou a redução da temperatura gera picos na curva de análise, representando a mudança de fase do material [5]. E para a análise dos dados obtidos nessa técnica foi utilizado o método das tangentes que é o indicado pela Norma ASTM F2082-06. Onde são traçadas retas tangentes a curva de aquecimento e resfriamento, e quando ocorre pontos de inflexão juntamente com ponto de intersecção, indica a temperatura de transformação de fase.

Mesmo a liga NiTi sendo a mais indicada como suas variedades de características e leque de opções para a aplicação, ainda é um estudo muito superficial de temperaturas e comportamentos da liga. E buscando uma aplicação específica para o acionamento de um atuador faz-se necessário encontrar a melhor combinação de tratamentos térmicos com tempos de permanência do corpo de prova, junto com o ensaio de RET para verificar qual oferecerá maior eficiência na finalidade.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar e discutir a influência de tratamentos térmicos em ligas de Niti equiatômica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver tratamentos térmico nos corpos de provas com 5 temperaturas e 4 tempos diferentes;
- Realizar ensaio de resistência elétrica por temperatura (RET);
- Caracterizar as curvas de temperatura de fase do fio de NiTi;
- Aplicar um planejamento experimental e obter equações que governem com exatidão o comportamento das temperaturas de transformações de fase com o tratamento térmico aplicado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi elaborado e executado no laboratório de projetos do centro de engenharias da UFERSA do campus Mossoró. Visando realizar uma caracterização da liga NiTi, assim como apontar a influência de tratamentos térmicos em temperaturas e tempos variados foi traçado um plano de ações necessárias para chegar aos objetivos desejados. E para organizar, elaborar o planejamento e executar as ideias propostas, seguiu o seguinte fluxo: Selecionar amostras → Definir temperaturas do tratamento térmico → Tratamento térmico → Ensaio de RET → Caracterização dos dados.

Com os dados caracterizados foi utilizado para um planejamento experimental em dois blocos que foi possível obter modelos que expressa com proximidade a variação das temperaturas de transformação de fase com os parâmetros de tratamento térmico e assim alcançar o objetivo de entender o comportamento dessa liga NiTi com maior exatidão.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado para os experimentos e análises desse trabalho foi de liga NiTi equiatômico (aproximadamente 50% de cada composto) com características de memória de forma já ativada e martensítico a

temperatura ambiente (30°C), segundo o fabricante do fio. O material em formato de fio com 1mm de diâmetro e 6cm de comprimento foi o formato utilizado para as amostras.

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Utilizando um forno de mufla fabricado pela GP Científica, como na figura 03, para a realização do tratamento térmico, as amostras foram levadas ao aquecimento de 350°C, 400°C, 450°C, 500°C e 550°C em momentos diferentes para cada ciclo. Os tempos de permanência em cada temperatura foram de 15, 20, 25 e 30 minutos, assim 4 amostras para cada temperatura, totalizando 20 amostras e todas resfriadas ao ar livre e calmo.



Figura 03: Forno de mufla utilizado no tratamento térmico. (Autoria própria).

3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA POR TEMPERATURA

Para a análise das temperaturas de transformação de fase foi realizado através do ensaio de resistência elétrica do material por temperatura. Para isso foi necessário primeiro organizar as amostras, montar sistema de aquisição e instrumentação para captação dos dados.

Foi realizado a interligação de quatro fios à amostra, sendo 2 para fonte elétrica e 2 para aquisição de dados. Porém para não realizar solda de estanho com contato direto na amostra e com o objetivo de evitar ao máximo não interferir nos resultados a serem gerados foi soldado uma chapa de aço junto a amostra através de solda ponto, utilizando uma microsoldadora KERNIT, modelo SMP 3000 GOLD, como a da figura 04, e então soldado o fio condutor a essa chapa de aço por meio de solda estanho, que pode ser visto na figura 05.



Figura 04: Microsoldadora Kernit SMP (Autoria própria).



Figura 05: Solda nas amostras para realizar RET (Autoria própria).

Com as amostras preparadas, é necessário um sistema que varie controladamente a temperatura e monitore a resistência elétrica. Assim para o controle da temperatura foi utilizado o sistema banho maria ultratermostático com refrigeração NT281 da Nova Técnica, junto com uma fonte de energia elétrica da Keysight E3633A.

Os fios de Niti foram submersos no meio líquido do banho maria para o RET, como ilustrado na figura 06, além do acompanhamento da temperatura por meio do próprio equipamento, também foi mergulhado 8 termopares perto de cada amostra para tentar ser mais pontual e realista a cada localização dos fios, visto que foram mergulhadas 8 amostras de uma vez.

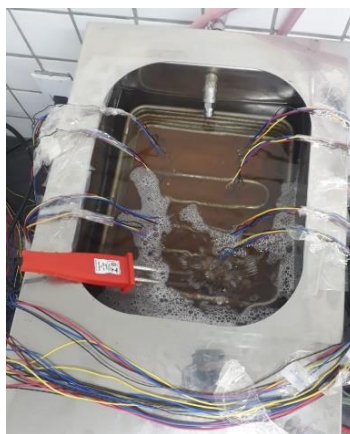


Figura 06: Amostras mergulhada para ensaio RET.
(Autoria própria).

A temperatura inicial do ensaio das amostras é de 100°C , até mesmo por conta do limite máximo do equipamento. Quando as amostras atingem essa temperatura, desliga-se o aquecimento e liga o resfriamento, indo até -10°C , para em seguida aquecer novamente até 100°C e fechar o ciclo térmico do ensaio. Já a corrente elétrica do processo é mantida constante em 0,3A e o cálculo da resistência elétrica é as tensões obtidas durante o ensaio dividido pela corrente elétrica, seguindo a 1ª Lei de Ohm.

A aquisição dos dados foi por meio do Módulo de Aquisição de Dados 34970A, fabricado pela Keysight Technologies, e utilizando software Agilent Benchlink. A análise foi realizada através do método das tangentes que traça retas tangente nos pontos de inflexão das curvas e indica transformação de fase quando as retas se interceptam, conforme indicado pela ASTM F2082-06. E os resultados alcançados serão plotados por meio do software *Origin*, por conta da grande quantidade de dados gerados. Todos os tratamentos e ensaios foram realizados no laboratório de projetos, e instrumentação montados conforme pode ser visto na figura 07.

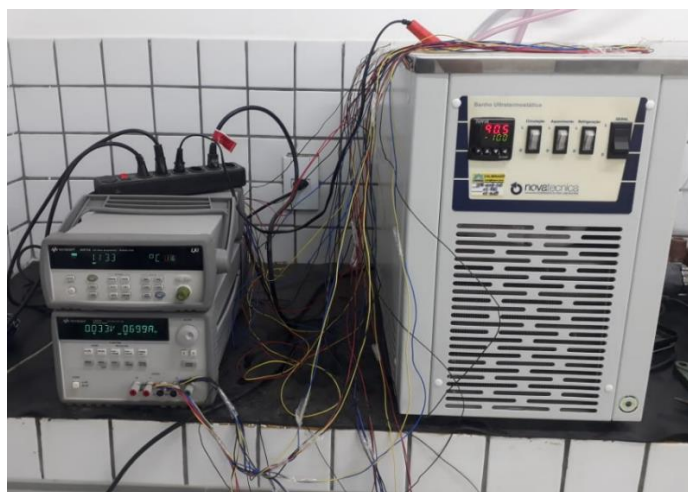


Figura 07: Sistema de aquisição e o RET. (Autoria própria).

4. RESULTADOS

Nos gráficos obtidos após a realização dos ensaios RET foi possível observar as transformações de fase de austenita para martensita durante o resfriamento e de martensita para austenita durante o aquecimento. De forma visual nos gráficos, é possível perceber os pontos de inflexão das curvas, quando muda o sentido da curva, e indica uma variação das propriedades com a alteração da microestrutura.

Na Figura 08 mostra-se os resultados obtidos com uma amostra tratada a 400°C por 25 minutos de duração. É possível observar a curva característica obtida com esse tipo de teste, de forma que se identifica as diferentes fases microestrutural do material.

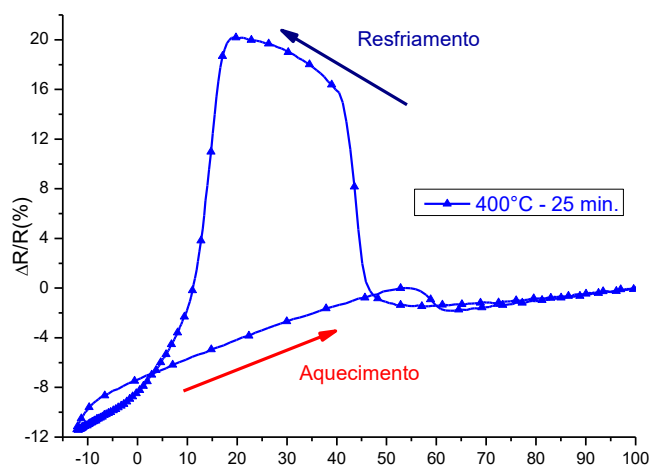


Figura 08: Gráficos RET de amostras tratadas termicamente a 400°C

Para essa amostra em específico foi possível observar a presença de 3 fases diferentes (Romboédrica e Martensítica durante o resfriamento e Austenítica durante o aquecimento). Nesse gráfico podemos perceber que houve o surgimento de uma fase entre a austenita e a martensita durante o resfriamento. A presença desse pico adicional representa o surgimento da fase romboédrica, intermediando a transformação austenita-martensita durante o ensaio. Como [2] afirmou, que dependendo da composição química, pode haver a presença de uma outra fase, que aparece durante o resfriamento, denominada de fase romboédrica.

Na Figura 09 mostra-se gráfico obtido com uma amostra tratada termicamente a 500°C com duração de 15 minutos, para a análise de influência da temperatura sob as transformações de fases do material.

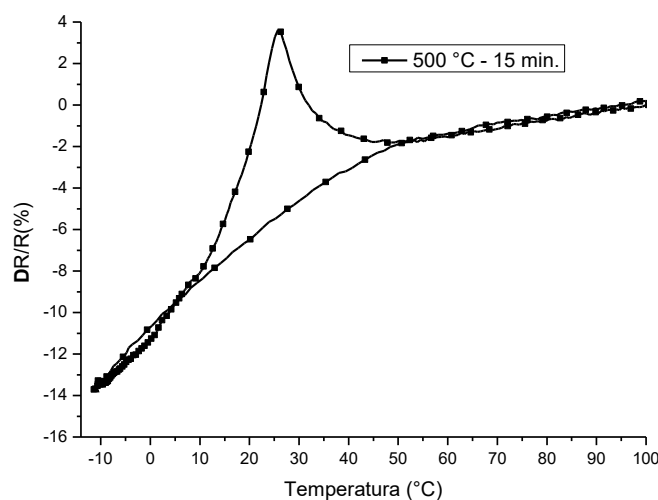


Figura 09: Gráficos RET de amostras tratadas termicamente a 500°C

Comparando o comportamento entre os gráficos das Figuras 09 e 08, é possível observar uma inflexão maior quando tratados a 500°C. Isso nos mostra o comportamento de transformação de fase Austenita – Martensita de forma mais rápida e direta, sem o surgimento da fase romboédrica. Para aplicações de ligas com efeito de memória de forma como atuador termomecânico o surgimento de uma fase intermediária entre a Austenita e a Martensita não é um fenômeno bem vindo. Além de levar um tempo maior e maior energia para a atuação, torna a atuação descontínua e não linear.

Através dos gráficos de RET obtidos para todas as amostras e usando a técnica das tangentes de acordo com as normas ASTM E 794-06 e E 793-06 para determinar a temperatura de transição de fase. A utilização desse método pode ser vista na Figura 10 no gráfico do RET com tratamento a 350° em 15 min., onde cada intersecção de reta tangente representa a temperatura de uma transformação de fase, nesse caso houve 6 intersecções, então 6 temperaturas: sendo R_i , R_f , M_i , M_f , A_i , A_f , enfatizados com os círculos em preto.

Importante ressaltar o erro que estamos expostos com o uso do método das tangentes por ser um modelo seguido não automático por software, e sim com retas traçadas manualmente sobre as curvas geradas. Por isso que os valores encontrados das temperaturas são apenas estimativas e não números exatos. Além das variações que podem ocorrer no ambiente laboral do experimento.

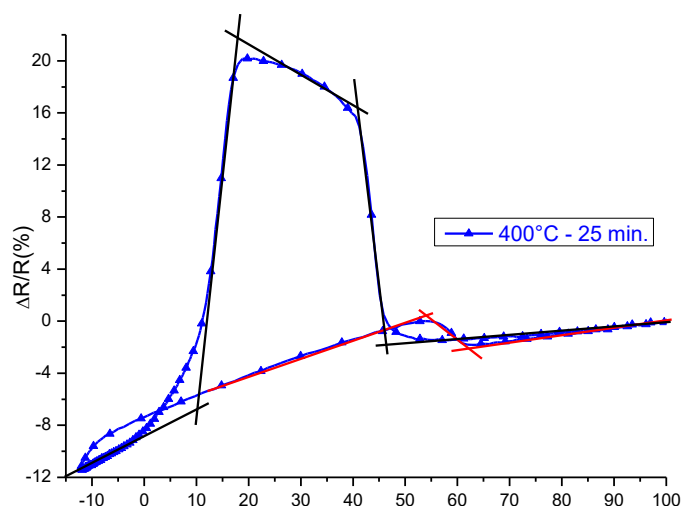


Figura 10: Gráficos RET de amostra tratada termicamente a 400°C com duração de 25min

Partindo dos gráficos gerados e a utilização do método das tangentes foi estimado as temperaturas de transformação de fase dos ensaios para todas as amostras conforme podemos observar na tabela 1. Sendo:

M_i : Temperatura de início da transformação Martensítica;

M_f : Temperatura de término da transformação Martensítica;

R_i : Temperatura de início da transformação Romboédrica;

R_f : Temperatura de término da transformação Romboédrica;

A_i : Temperatura de início da transformação Austenítica;

A_f : Temperatura de término da transformação Austenítica;

TEMP. (°C)	TEMPO (min)	M_i (°C)	M_f (°C)	R_i (°C)	R_f (°C)	A_i (°C)	A_f (°C)
350	15	-2,39	-16,3	48,48	34,78	45,58	53,06
	20	12,98	4,15	53,26	47,43	48,07	55,55
	25	6,34	-0,94	31,25	28,55	38,3	46,18
	30	18,58	-3,64	46,61	42,89	49,11	53,26

400	15	20,88	-5,11	42,78	36,06	44,51	50,35
	20	7,23	-0,33	35,4	32,37	46,9	51,44
	25	17,85	8,53	46,45	41,91	52,53	63,36
	30	21,75	14,61	45,59	38	53,38	60,97
450	15	12,00	6,59	30,65	27,83	47,53	62,94
	20	23,93	17,85	45,15	41,48	54,26	64,44
	25	12,77	8,19	30,41	26,67	40,38	53,87
	30	39,34	21,27	-	-	52,62	61,98
500	15	34,98	26,30	-	-	36,91	52,1
	20	73,00	57,00	-	-	69,00	80,00
	25	22,42	11,53	-	-	21,27	29,37
	30	33,01	17,21	-	-	36,28	53,38
550	15	58,37	39,96	-	-	63,58	81,34
	20	37,05	3,41	-	-	43,71	67,79
	25	34,56	11,53	-	-	57,82	65,5
	30	42,47	15,04	-	-	61,35	69,67

Tabela 01: Temperaturas de transformação de fases obtidas no RET.

Com todos os ensaios realizados com as 20 amostras e todos os gráficos plotados caracterizando as curvas de comportamento da microestrutura, é possível observar uma pequena tendência de deslocamento das curvas para a direita a medida que aumenta a temperatura de tratamento, indicando um aumento na temperatura de inicialização da austenita. E que a microestrutura de fase romboédrica não houve o surgimento quando o fio tratado a 500°C e 550°C em todas as durações e em 450°C na duração de 30min.

Assim confirma o que [6,7] explica, onde ciclagem térmica e envelhecimento podem facilitar o surgimento da transformação romboédrica. E fatores estão envolvidos no processo de decomposição de fases, dentre elas, os precipitados de Ti_3Ni_4 . Este precipitado interage com as tensões internas do material, forçando o deslocamento da transformação martensítica para temperaturas mais baixas e permitindo a evolução da fase R.

Pode-se observar que a medida que aumenta a temperatura de tratamento térmico, existe uma presença cada vez maior da fase martensítica. Além disso, é possível constatar que as maiores temperaturas de austenitização ocorreu em amostras em que não houve a fase romboédrica e em temperaturas a cima de 450°C.

Com base nas temperaturas obtidas através dos ensaios RET fez-se um planejamento experimental para obtenção de equações que governassem o comportamento da variação das temperaturas de transformação de fase com o tratamento térmico aplicado. Para tanto dividiu-se os resultados em dois grupos, sendo: amostras que não apresentam a fase Romboédrica e amostras que apresentam essa fase. Essa divisão foi feita levando-se em conta que o objetivo maior é utilizar a liga NiTi como elemento atuador termomecânico e que a fase Romboédrica não se faz interessante para essa aplicação. Foi realizado o DOE com *Central Composite, Non-Factorial, Surface Desagner*, para gerar os pontos axiais da análise com dois fatores (Tempo e Temperatura), um bloco e 10 experimentos (2/1-10). Foi gerado o planejamento codificado apresentado na Figura 11 com os limites inferior, superior e os pontos axiais positivo e negativo. Os parâmetros A e B correspondem ao tempo e temperatura respectivamente. Já Mi, Mf, Ai e Af correspondem as temperaturas de transição de fase. Foi considerado as temperaturas de 450, 500 e 550 °C e os tempos de 20, 25 e 30 minutos.

2**(2) central composite, nc=4 ns=4 n0=2 Runs=10 (Spreadsheet1)						
Standard Run	Tepo(min)	Temperatura (°C)	Mi	Mf	Ai	Af
1	15,00000	500,0000	39,34	21,27	52,62	61,98
2	20,00000	500,0000	73,00	57,00	69,00	80,00
3	30,00000	550,0000	42,47	15,04	61,35	69,67
4	30,00000	500,0000	33,01	17,21	36,28	53,38
5	15,00000	550,0000	58,37	39,96	63,58	81,34
6	20,00000	550,0000	37,05	3,41	43,71	67,79
7	30,00000	450,0000	39,34	21,27	52,62	61,98
8	30,00000	450,0000	39,34	21,27	52,62	61,98
9 (C)	25,00000	500,0000	22,42	11,53	21,27	29,37
10 (C)	25,00000	550,0000	34,56	11,53	57,82	65,50

Figura 11: Planejamento codificado com resultados dos ensaios

Através da análise dos dados obteve-se o diagrama de pareto para as temperaturas Martensíticas e Austeníticas, inicial e final, conforme observado na Figura 12.

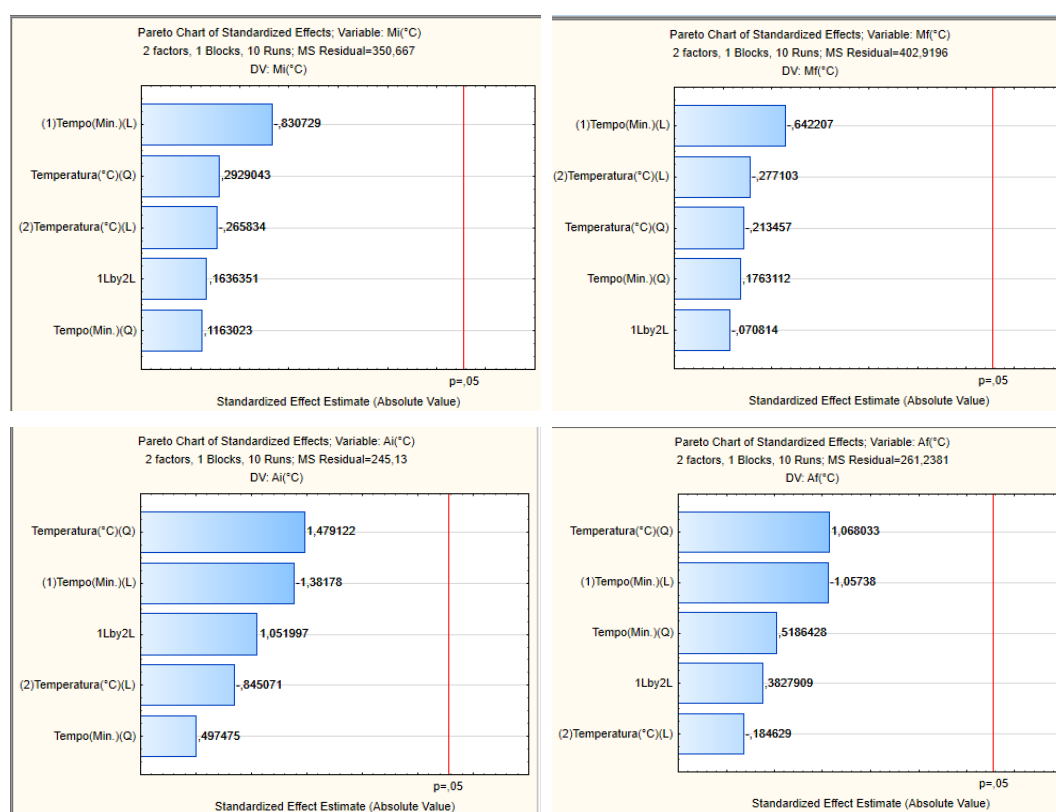


Figura 12: Diagrama de pareto com as temperaturas Martensíticas e Austeníticas

Através dos diagramas apresentados na figura 12 é possível observar que as temperaturas martensíticas e austeníticas inicial tem uma dependência maior com a temperatura do tratamento térmico, já a temperatura martensita final apresenta uma dependência maior com o tempo do tratamento, entretanto essa dependência direta é relativamente baixa, o que se distancia de um comportamento linear.

Analisando a superfície de resposta possibilitou chegar as imagens apresentadas na figura 13.

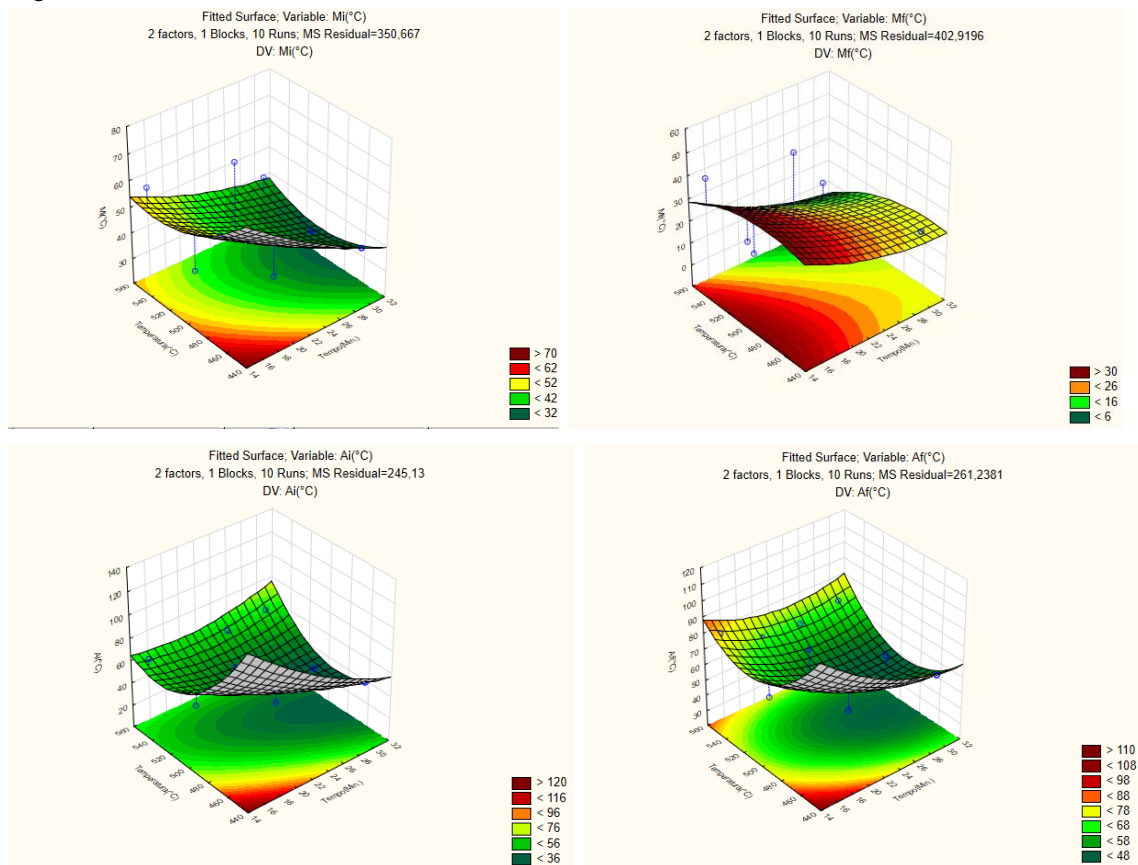


Figura 13: Superfícies de resposta ao diagrama de pareto.

Foi obtido a equação que governa o comportamento para as 4 temperaturas de transformação de fase em função dos parâmetros Tempo(x) e Temperatura(y), conforme segue:

$$TM_i(x,y) = 776,08899999945 - 6,6533999999937 * x + 0,030799999999989 * x^2 - 2,49041999999982 * y + 0,0222799999999985 * y^2 + 0,0077519999999891 * x * y$$

$$TM_f(x,y) = -349,93499999996 - 1,6072500000012 * x + 0,050050000000008 * x^2 + 1,7230324999999 * y - 0,0017404499999999 * y^2 - 0,003595999999985 * x * y$$

$$TA_i(x,y) = 3078,07499999979 - 27,7257499999975 * x + 1,11014999999995 * x^2 - 10,5782724999993 * y + 0,0094068499999941 * y^2 + 0,041667999999957 * x * y$$

$$TA_f(x,y) = 2102,36099999987 - 14,6893499999985 * x + 1,1854999999997 * x^2 - 7,41697249999957 * y + 0,0070120499999964 * y^2 + 0,015651999999974 * x * y$$

Embora não seja um comportamento linear, conforme observado nos gráficos de superfície e nas equações obtidas, pode-se perceber que as maiores temperaturas M_i , M_f , A_i e A_f serão obtidas para tratamentos térmicos em temperaturas mais elevadas e tempos menores.

As equações que governam o comportamento de cada transformação de fase para cada tratamento térmico aplicado a liga com efeito de memória de forma consiste no principal resultado desse estudo. A partir destas equações consegue-se obter qual conjunto de parâmetros (Tempo e Temperatura) deve ser aplicado no tratamento térmico para conseguir um atuador com uma temperatura de transformação de fase específica requisitada para sua aplicação.

4. CONCLUSÃO

Através desse estudo foi possível realizar a caracterização de amostras de uma liga NiTi submetidas a diferentes tratamentos térmicos. O ensaio de RET mostrou-se eficiente na determinação das temperaturas de transformação de fase através da utilização do método das tangentes nas curvas obtidas.

Conforme esperado foi observado a dependência das temperaturas de transformação de fase com o tempo e a temperatura aplicado no tratamento térmico. Com os resultados foi possível fazer o planejamento experimental para obter equações que governem o comportamento dessas temperaturas de transformação de fase com os parâmetros de tratamento térmico, possibilitando agora fazer uma varredura de parâmetros e assim definir qual tempo e temperatura deve ser aplicado para obter uma temperatura de transformação de fase específica

De forma geral, os objetivos foram alcançando, onde os resultados mostram que foi possível encontrar as temperaturas de transformação de fase para diferentes condições de estado da amostra e perceber a possibilidade de aplicação desse tipo de material como atuadores para situações específicas, que inclusive já vem sendo utilizado na medicina e engenharia.

Como estudos futuros faz-se necessário aplicar outros tratamentos experimentais e realizar uma validação das equações obtidas, para definir qual modelo apresenta maior exatidão.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Vilar, Zoroastro Torres. Comportamento Eletro-termomecânico de um Compósito Ativo de CFRP com Fios Ni-Ti Embebidos. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- [2] Otsuka K.; Wayman C. M. Shape memory materials. Cambridge University Press, 1998.
- [3] Viana, Thiago Souza. Influência de tratamentos térmicos de recozimento na microestrutura de uma liga NiTi pseudoplástica. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- [4] Sashihara, Eduardo Massao. Produção da Liga Ni-Ti com Efeito de Memória de Forma em Forno de Fusão por Feixe Eletrônico e sua Caracterização. Dissertação (Mestrado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.
- [5] Barbosa, Marcos Paulo Simões. Controle da temperatura de transformação de fase em uma liga niti através do tratamento térmico de betatização. Monografia (Graduação), Universidade Federa Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.
- [6] Corneliu M. Craciunescu, Jian Li, Manfred Wuttig. Contrained martensitic transformations in TiNiCu films. Department of Materials and Nuclear Engineering, University of Maryland, College Park, USA, 2003.
- [7] David, A. M.; Dimitris, C. L. Influence of cold work and heat treatment on the shape memory effect and plastic strain development of NiTi. Materials science & engineering. A, Structural materials, 2001.